

論文 高強度コンクリートの強度特性に及ぼす骨材物性の影響

梶尾 聡^{*1}・小島 明^{*1}・中村秀三^{*2}

要旨：骨材強度とコンクリート強度は一般には相関し、高強度コンクリートを作るには高強度の骨材が必要であることが実感されている。一方、コンクリートと粗骨材の強度は対応しないとの報告もある。強度計算のための骨材マトリクスの複合モデルは界面の影響を取り込むことが困難で提案されているものも数少ない。本研究では、強度の異なる骨材とペーストからなるコンクリートを用いて実験的検討を加えた結果、コンクリートの圧縮強度は、マトリクス骨材の界面の影響を骨材への応力伝達域を制限したモデルによって良く算定されることを示せた。

キーワード：砂岩、石灰石、骨材、圧縮強度、静弾性係数、動弾性係数、複合モデル

1. はじめに

近年、 100N/mm^2 を超える高強度コンクリートの施工事例が増加しているが、主に原石強さが比較的高い硬質砂岩系の骨材などが使用されている。一方、石灰石骨材はコンクリート用骨材としては、一般的に用いられている岩石として、唯一鉄のモース硬度5.5より軟らかいため、高強度コンクリート用骨材として積極的に利用されていない。しかし、既往の文献ではコンクリートと粗骨材の強度は対応しない¹⁾²⁾と報告されているものや、石灰石骨材が高強度コンクリート用骨材として十分な強度を有している³⁾と報告しているものもある。

本研究は高強度コンクリートにおける強度特性に及ぼす粗骨材物性の影響を確認することならびに強度算定モデルを提案することを目的とし、産地の異なる硬質砂岩碎石と石灰石碎石とペーストを用いたコンクリートにおける強度特性を実験的に検討したものである。

2. 実験概要

実験水準を表-1に示す。

2.1 使用骨材

使用骨材は、三重県藤原産ならびに北海道峯朗産の石灰石碎石と茨城県岩瀬産ならびに東京

都青梅産の硬質砂岩碎石の合計4種とした。骨材の外観を写真-1に示す。骨材は、粒径の影響を排除するため、13mmから20mmとなるようにふるい分けを行った。また、骨材に付着した微粒分の影響を取り除くため、水洗いしたものを使用した。

2.2 骨材の強度試験

骨材の岩種および産地の違いと骨材の強度特性の関係を確認するために、点載荷圧裂試験および圧縮強度試験を実施した。試験に用いた骨材は、コンクリート中の骨材を忠実に反映するようにコンクリートに使用した碎石を用いた。

表-1 実験水準表

記号	藤原	峯朗	岩瀬	青梅
骨材 産地	三重県 藤原	北海道 峯朗	茨城県 岩瀬	東京都 青梅
岩種	石灰石碎石		硬質砂岩碎石	
ペースト W/C	16, 20%	16%	16, 20%	16%
骨材 含有率	0(ペーストのみ), 0.20, 0.45, 0.55			
養生	16%—85℃蒸気と20℃水中28日 20%—20℃水中28日と91日			
骨材 試験	10mm立方体圧縮試験 点載荷圧裂試験—引張強度			
コンクリート 試験	圧縮試験 静弾性係数, 動弾性係数			

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 第一研究部 建設技術グループ(正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 第一研究部 建設技術グループ リーダー(正会員)

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度は、写真-2 に示すように 13-20mm の碎石からコンクリートカッタを用いて一辺 10mm の立方体を切り出し整形した試料を使用し、平板治具間で圧縮載荷することにより求めた。

(2) 引張強度試験

引張強度は既往の文献⁴⁾を参考とし、写真-3 に示すように半径 75mm の球面の突起をもつ圧盤 2 個の間に 13-20mm の碎石をそのままの形ではさみ、耐圧試験機にて載荷する点載荷圧裂試験によって求めた。平松ら⁴⁾による解析結果より、引張強度 St は最大破壊荷重 Ft 、載荷点間の距離 d を用いて近似的に式(1)で与えられる。

$$St = 0.9 Ft / d^2 \quad (1)$$

2.3 コンクリートの配合

コンクリートは、細骨材を使用せず、粗骨材とペーストの複合体とした。コンクリート中の骨材含有率(体積比)は、0(ペーストのみ)、0.2、0.45、0.55 の 4 水準とした。水セメント比は 16% および 20% の 2 水準とし、16% では 4 種類の骨材を使用し、20% では藤原および岩瀬を使用した。セメントおよび混和剤は、低熱ポルトランドセメント(密度: 3.22g/cm^3) およびポリカルボン酸系高性能減水剤を使用し、空気泡の影響を排除するため消泡剤を併せた。

2.4 コンクリートの練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜはペーストが十分練り混ぜられたことを確認した後、粗骨材を投入する方法とした。水セメント比 20%、骨材含有率 0 および 0.2 の水準はパン型ミキサにより 8 分練り混ぜた。0.45 および 0.55 の水準はパン型ミキサでは負荷が大きくなったため、二軸強制ミキサにより 5 分練混ぜとした。水セメント比 16% の水準はオムニミキサにより 7 分練り混ぜた。

2.5 供試体の作製方法

供試体は $\phi 10 \times 20$ cm 円柱供試体を用いた。養生方法は促進養生および標準養生を行った。促進養生は打設材齢 2 日まで前置きしてから

85℃の蒸気養生を 2 日間行った。標準養生は打設翌日に脱型し、20℃水中で静置した。試験材齢は、水セメント比 16% の水準の促進養生は 6 日、標準養生は 28 日とし、水セメント比 20% の水準は標準養生 28 日および 91 日とした。

2.6 コンクリート試験の概要

コンクリートで実施した試験を以下に示す。

(1) 圧縮強度、静弾性係数試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に、静弾性係数試験は JIS A 1149 に準拠して行い、試験機の剛性や球座が測定値のばらつきを招かないよう高剛性試験機と供試体寸法に合った球座を使用した。

(2) 動弾性係数

動弾性係数試験は JIS A 1127 に準拠して行い、圧縮強度試験用供試体を用いて、圧縮強度試験前に縦振動の一次共鳴振動数を測定し、動弾性係数を求めた。



1) 藤原



2) 義朗



3) 岩瀬



4) 青梅

写真-1 粗骨材の外観



写真-2
圧縮試験用骨材供試体



写真-3
点載荷圧裂試験

3. 結果と考察

3.1 骨材試験の結果と考察

骨材の試験結果を表-2に示す。

(1) 圧縮強度

骨材の圧縮強度試験の結果をヒストグラムに表したものを図-1に示す。

圧縮強度の平均値は、低いものから藤原、峯朗、岩瀬、青梅の順で、石灰石の強度が硬質砂岩の強度よりも低かった。しかし、最も低い藤原の強度でも 166N/mm^2 あり、また、峯朗と岩瀬の差はほとんどなかった。最も高い青梅の強度は 270N/mm^2 で、最小のものと最大のもので圧縮強度に約 1.6 倍の違いがあった。

強度測定結果のばらつきは非常に大きく、変動係数はいずれも 30% を越えた。圧縮試験を 10mm 角の小さな試験体を用いて行ったため、試験機球座の大きさとの不適合等により試験結果のばらつきがより大きなものになったと考えられる。特異値を排除するために 1σ の外にある値を除いて再平均した結果 (1σ 内平均値) と全サンプルの平均を比べると、石灰石でその差が小さく、硬質砂岩で大きかった。また、ヒストグラムの分布形状から、藤原、峯朗の石灰石は比較的骨材強度のばらつきが少なく、低強度側と高強度側のふたこぶ状の分布を示した岩瀬硬質砂岩は骨材強度のばらつきが比較的大きいものと思われる。

(2) 引張強度

点載荷圧裂試験により求めた骨材の引張強度をヒストグラムに表したものを図-2に示す。

引張強度の平均値は、低いものから藤原、峯朗、青梅、岩瀬の順で、圧縮強度の場合と同じく石灰石の強度が硬質砂岩の強度よりも低かった。しかし、青梅と岩瀬の順位は入れ替わった。また、各骨材間の強度差割合も圧縮強度の場合とは異なった。最小のものと最大のものの引張強度差は圧縮強度の場合より大きく約 2 倍の違いがあった。

変動係数は、圧縮強度より大きいのが、分布の形は比較的正規分布に近い形を示していた。

表-2 骨材試験の結果

記号	藤原	峯朗	岩瀬	青梅
岩種	石灰石碎石		砂岩碎石	
骨材産地	三重県 藤原	北海道 峯朗	茨城県 岩瀬	東京都 青梅
表乾密度 (g/cm^3)	2.70	2.72	2.65	2.66
吸水率(%)	0.39	0.58	0.62	0.56
圧縮強度(N/mm^2)試験結果				
試料数	17	16	15	16
平均値	166.5	214.6	216.4	269.6
1σ 内平均値	168.8	216.0	246.6	283.6
標準偏差	51.2	64.4	111.9	87.8
変動係数(%)	30.8	30.0	51.7	32.6
算定値	188.3	201.5	273.5	253.0
点載荷圧裂試験結果/引張強度(N/mm^2)				
試料数	19	20	20	17
平均値	10.1	14.8	19.5	16.8
1σ 内平均値	9.5	11.2	20.2	17.7
標準偏差	3.1	8.4	7.2	7.0
変動係数(%)	31.0	56.3	37.1	41.6
弾性係数(kN/mm^2)				
算定値	73.2	68.4	70.6	64.7

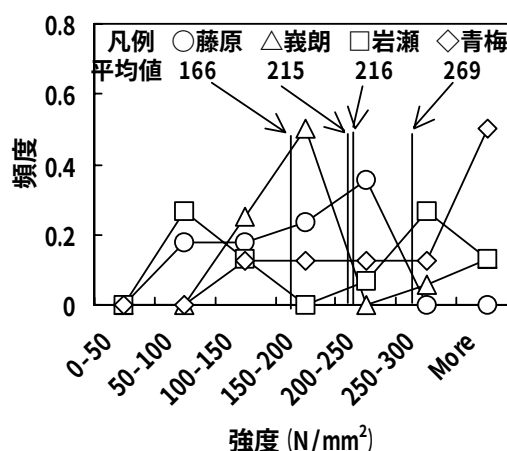


図-1 骨材圧縮強度の分布図

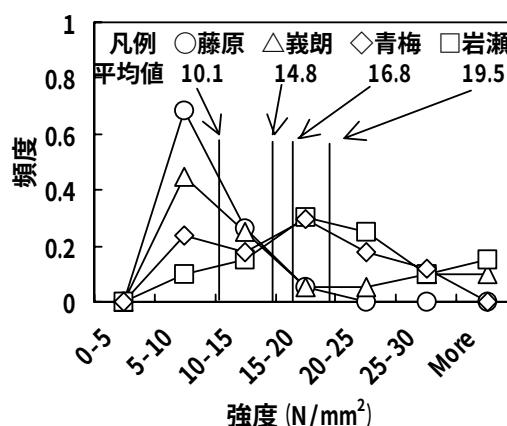


図-2 骨材引張強度の分布図

(3) 圧縮強度と引張強度の関係

図-3 に骨材の圧縮強度と引張強度の関係を、それぞれ 1σ 内平均値を用いてプロットしたものを示す。

骨材の圧縮強度と引張強度には比較的良好な相関関係が見られた。この関係式を用い、引張強度から圧縮強度を算定した値を表-2 に示す。

3.2 コンクリートの試験結果と考察

(1) 圧縮強度

コンクリートの測定値のばらつきは、骨材の測定値のばらつきが非常に大きいにも係らず非常に小さく変動係数は概ね 5% 程度であった。

骨材含有率とコンクリートの圧縮強度の関係を図-4 に示す。骨材の含有率が増加するとコンクリートの圧縮強度が低下した。なお、図に表示しなかった他の水準も同じ傾向を示し、大別すると石灰石が砂岩かで低下割合が分かれた。骨材の含有率の増加に伴いコンクリート強度が低下する結果は、川上⁵⁾の研究と同じ傾向である。しかし、その低下割合は、本研究の方が非常に大きなものとなった。この原因は、本研究においてはマトリクス部に砂を用いておらずマトリクス部と骨材の不連続性を大きく設定していることによると思われる。

マトリクス強度が骨材強度を下回っている場合、骨材強度の差はコンクリート強度に影響していないが、骨材強度をマトリクス強度が上回る場合、骨材強度の差がコンクリート強度に影響する結果となった。この結果は、森濱⁶⁾らの研究と同様の傾向であった。

(2) 弾性係数

骨材含有率と各水準の静弾性係数ならびに動弾性係数の関係を図-5 に、静弾性係数と動弾性係数の関係を図-6 に示す。骨材含有率が増加すると、強度の場合とは逆にコンクリートの静弾性係数、動弾性係数とも増加した。これは、骨材の方がペーストより弾性係数が高いことによるものである。

ペーストならびに石灰石コンクリートでは動弾性係数と静弾性係数は、ほぼ等しい値を示し

たが、砂岩コンクリートでは静弾性係数と動弾性係数は乖離した結果を示した。また、骨材含有率が増加するほど、その乖離度が増加した。圧縮試験中の応力-ひずみ曲線も、ペーストならびに石灰石コンクリートは、破壊までほぼ直線であるのに対し、砂岩コンクリートでは、上に凸の曲線を描いた。このことは、石灰石骨材

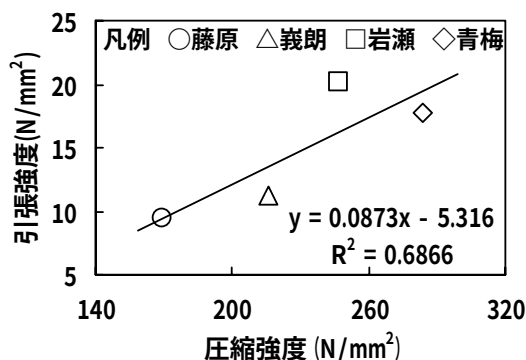


図-3 骨材圧縮-引張強度の関係

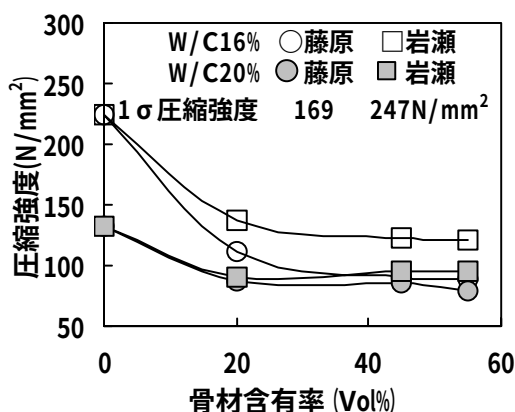


図-4 骨材含有率と圧縮強度の関係

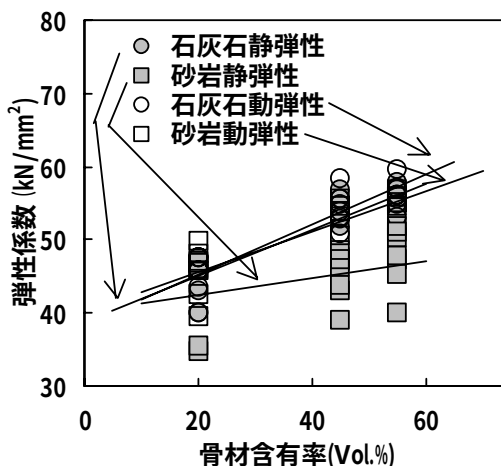


図-5 骨材含有率と弾性係数の関係

とマトリクスの一体性が良好であるのに対し砂岩骨材では一体性が良好でないことに起因していると考えられる。

(3) 骨材の弾性係数

複合体の弾性係数評価モデルとして Hashin-Hansen モデル⁵⁾が提案されており、マトリクスの弾性係数 E_m と骨材の弾性係数 E_a ならびに、それぞれの体積率 V_m, V_a から複合体の弾性係数 E_c を式(2)で与えることができる。

$$E_c = E_m \frac{[V_m E_m + (1 + V_a) E_a]}{[(1 + V_a) E_m + V_m E_a]} \quad (2)$$

ここに、 $V_a + V_m = 1$

本研究では、マトリクス部とコンクリート(複合体)の弾性係数を実測してあるので式(2)を用いて骨材の弾性係数を逆算することができる。この時、弾性複合モデルはマトリクスと骨材のずれを考慮していないので、代入する弾性係数を動弾性係数とした。

算定結果を図-7に示す。硬質砂岩と比較すると石灰石は骨材強度に比して弾性係数が高く、骨材の強度と弾性係数の相関性は認められなかった。ばらつきはあるが、正規分布に近い形状を示していることから、比較的良好に算定できたと考えられる。コンクリートを骨材とマトリクスの複合弾性体として弾性域での評価モデルとして Hashin-Hansen のモデルは適していると評価できた。

(4) 複合体の強度算定モデル

コンクリートを骨材とマトリクスの複合体としての強度算定モデルは、骨材の圧縮強度ならびに弾性係数を特定することが困難なこと、また、マトリクスと骨材との界面をモデル化することが困難なことから適当なモデルがなかった。

ここでは、図-8に示すよう立方体中心に骨材体積相当のコア立方体(一辺 $V_a^{1/3}$)を置き、骨材-マトリクス混在部分の骨材とマトリクスのひずみは等しいとし、マトリクスと骨材との界面の影響から骨材にはある割合の部分にしか

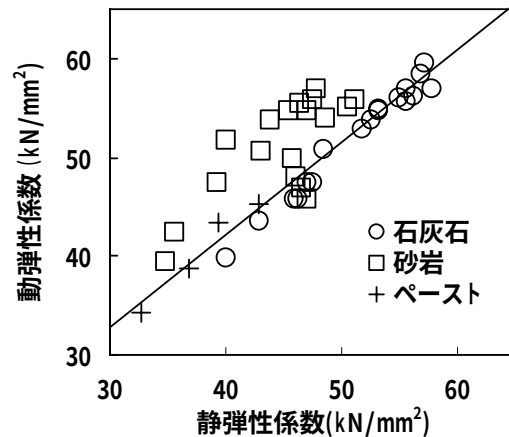


図-6 静弾性係数と動弾性係数

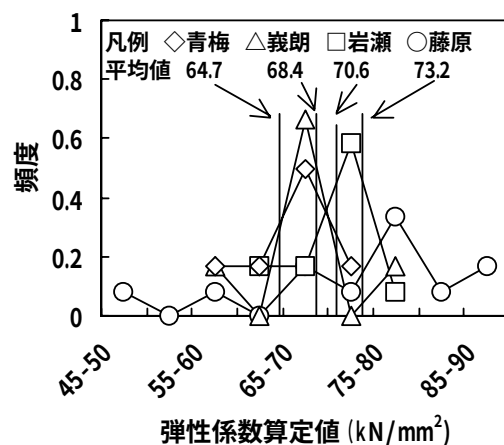


図-7 骨材弾性係数算定値の分布

応力が伝わらないとする複合モデルを提案する。破壊は、いずれかの部分のひずみが破壊ひずみに達した時に起こるとする。マトリクスと骨材は弾性体で破壊ひ

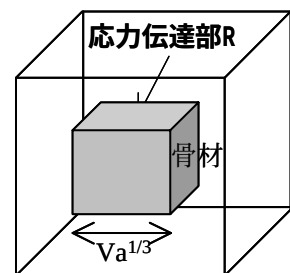


図-8 複合モデル

ずみは強度 f と弾性係数 E から f/E とする。

以上から、複合体の圧縮強度 f_c は、マトリクス、骨材の圧縮強度、弾性係数、体積率をそれぞれ $f_m, f_a, E_m, E_a, V_m, V_a$ とし、応力伝達面積割合 R から式(3)で計算される。

$$f_c = R \cdot V_a^{2/3} \cdot E_a \cdot \text{Min}(f_m/E_m, f_a/E_a) + (1 - V_a^{2/3}) \cdot E_m \cdot \text{Min}(f_m/E_m, f_a/E_a) \quad (3)$$

ここに、骨材の圧縮強度ならびに弾性係数を

表-2の算定値を用い、かつ $R=0.34$ とした場合の実測値と計算値の関係を図-9 に示す。ここで、骨材の圧縮強度は3.1節で説明した通り、実測値のばらつきが大きく、特性値として用いるのに適当でないと考え、本試験の範囲内で引張強度から圧縮強度を推定した算定値を骨材の圧縮強度を用いた。

両者は良好な相関を示していると評価でき、骨材-マトリクスの複合体において界面の影響を骨材上に応力伝達部を設定するという考え方でモデル化する本モデルに妥当性があると考えられる。また、 R は界面性状により変化する値であり、骨材とマトリクスの付着強度、骨材の寸法、形状に影響される値であると考えられる。そして、石灰石と砂岩ではペーストとの付着性状が異なっているにも係らず、両者間に R 値の差は見られなかった。よって、付着は本実験の範囲では破壊時の界面特性変化の要因としては小さな影響しか持ち得なかったものと推察される。

また、コンクリートの圧縮強度は、骨材粒それぞれの強度がばらついていても、その最低値で制御されてしまうのではなく、ある固有値(平均値など)で制御されるものと考えられる。これは、骨材強度のばらつきが骨材中の節理などにある場合、周りのペーストが節理部のすべりを拘束することによると推察される。

4. まとめ

コンクリートを、ペーストをマトリクスとした骨材との複合モデルとして考察した本実験の範囲において、以下のことが明らかとなった。

- (1)高強度のペーストおよび骨材とも、それぞれ弾性体として取り扱えるが、骨材の強度と弾性係数は相関していなかった。
- (2)コンクリートの弾性係数は骨材とマトリクスをそれぞれ弾性体とみなし、それぞれの体積率と弾性係数より Hashin-Hansen モデルで良く算定された。
- (3)コンクリートの圧縮強度は、マトリクス-骨

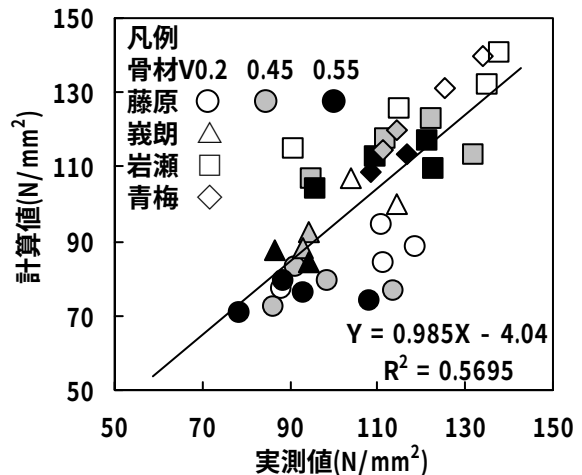


図-9 圧縮強度と実測値と計算値の関係

材の界面の影響を骨材への応力伝達域を制限したモデルによって良く算定された。

参考文献

- 1) 飛坂基夫：高強度コンクリートの圧縮強度および静弾性係数に及ぼす骨材の影響，セメント・コンクリート，No.394，pp30-33，1979
- 2) 森野奎二，田中良典：高強度コンクリートの強度性状に及ぼす各種骨材の影響，土木学会第 47 回年次学術講演概要集，5，PP.914-915，1992
- 3) 安本礼持，秋山達志，内田美生，永田邦博：石灰石骨材を使用した高強度コンクリートの強度特性，セメントコンクリート論文集，No.55，pp.479-485，2001
- 4) 平松良雄，岡行俊，木山秀朗：非整形試験片による岩石の引張り強さの迅速試験，日本鉱業会誌，Vol.81，No.932，pp.1024-1030，1965.12
- 5) 川上秀男：碎石コンクリートの弾性係数評価，コンクリート工学年次論文集，pp303-308，Vol.24，No.1，2002
- 6) 森濱和正，河野広隆，加藤俊二，土屋浩樹，骨材強度がコンクリートの圧縮および引張強度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，pp331-336，Vol.19，No.1，1997